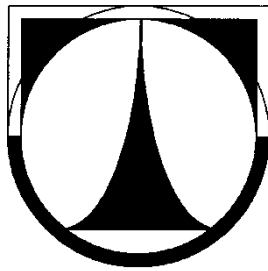


Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Bakalářský studijní program:

Strojírenská technologie

Zaměření:

Řízení výroby

Zvýšení přesnosti kalibrace elektronických libel a autokolimátorů v ČMI OI Liberec

Accuracy improvement calibration of electronical levels and autocollimators in ČMI OI Liberec

KOM - 1094

Eva Tyralíková

Vedoucí práce:

Doc. Ing. Karel Dušák, CSc.

Konzultant:

Ing. Petr Hajfler (ředitel ČMI OI Liberec)

Počet stran:

52

Počet příloh a tabulek:

10

Počet obrázků:

11

Počet modelů nebo jiných příloh:

--

Datum: 5.6.2009

Zvýšení přesnosti kalibrace elektronických libel a autokolimátorů v ČMI OI Liberec

ANOTACE:

Předkládaná bakalářská práce se zabývá možností zpřesnit kalibraci elektronických libel a autokolimátorů. V této práci jsou shrnuty dosavadní zkušenosti práce s elektronickými libelami a autokolimátory (ČMI OI v Liberci). Na základě rešerše kalibrace elektronických libel a autokolimátorů i metodiky vyjádření jejich nejistot měření je v práci podán návrh nového vyhodnocení jejich nejistoty měření. V závěrečné části je představeno celkové vyhodnocení, které shrnuje dosažené výsledky.

Accuracy improvement calibration of electronical levels and autocollimators in ČMI OI Liberec

ANNOTATION:

Construed baccalaureate work be engaged in possibility pecify calibration of electronic levels and autocollimators. In this work are lumped present experience work with electronical levels and autocollimators (ČMI OI in Liberec). On the basis background research calibration of electronic levels and autocollimators also methodists of the formulation theirs uncertainties measurement is in work handed up motion new interpretation theirs uncertainties measurement. In final parts is superior total interpretation, which summarises achieved results.

Klíčová slova: AUTOKOLIMÁTOR, LIBELA, NEJISTOTA MĚŘENÍ, KALIBRACE, ETALON.

Zpracovatel: TU v Liberci, KOM

Dokončeno: 2009

Archivní označ. zprávy:

Počet stran: 52

Počet příloh: 1

Počet obrázků: 11

Počet tabulek: 8

Počet diagramů: 2

MÍSTOPŘÍSEŽNÉ PROHLÁŠENÍ

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury pod vedením vedoucího a konzultanta.

V Liberci, 5.6.2009

PROHLÁŠENÍ

Byla jsem seznámena s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo) a § 35 (o nevýdělečném užití díla k vnitřní potřebě školy).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědoma toho, že užít svou bakalářskou práci či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

V Liberci, 5.6.2009

Obsah

Obsah	6
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	7
1. Úvod.....	8
2. Základní pojmy vztahující se k dané problematice.....	9
3. Nejistoty měření	19
3.1 Způsoby vyhodnocování nejistoty měření.....	19
3.1.1 Výpočetní stanovení nejistoty měření způsobem A	20
3.1.2 Výpočetní stanovení nejistoty měření způsobem B	20
3.2 Nejistota kombinovaná	22
3.3 Nejistoty rozšířené	22
3.4 Nejlepší měřicí schopnost.....	23
4. Metodika kalibrace elektronických libel a autokolimátorů	27
4.1 Způsoby kalibrace autokolimátorů	27
4.1.1 Současný způsob kalibrace autokolimátorů.....	27
4.1.2 Návrh nového způsobu kalibrace autokolimátorů	28
4.2 Způsoby kalibrace libel	29
4.2.1 Současný způsob kalibrace Libel.....	29
4.2.2 Návrh nového způsobu kalibrace libel	30
5. Statistické vyhodnocování experimentu	33
6. Výsledky a hodnocení experimentu	36
6.1 Výpočet nejistoty elektronického autokolimátoru	36
6.1.1 Současný způsob	36
6.1.2 Nový způsob	39
6.2 Výpočet nejistoty elektronické libely	43
6.2.1 Současný způsob	43
6.2.2 Nový způsob	45
6.3 Shrnutí výsledků vyhodnocení	47
7. Závěr.....	50

Seznam použitých zkratk a symbolů

ČMI	Český metrologický institut
OI	Oblastní inspektorát
CMC	Calibration and measurement capability (Kalibrační a měřicí schopnost dosažitelná za reálných podmínek)
BMC	Best measurement capability (Nejlepší možná dosažitelná měřicí schopnost za ideálních podmínek)
ÚNMZ	Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví
ÚFE AV ČR	Ústav fotoniky a elektroniky - Akademie věd české republiky
CIPM-MRA	International Committee for Weights and Measures(přeloženo z francouzštiny <i>Comité international des poids et mesures</i>) Mutual Recognition Arrangement (Ujednání o vzájemném uznávání státních etalonů a kalibračních listů vydaných jejich instituty)
NMI	Národních metrologické instituty
ELCOMAT 3000	Fotoelektrický autokolimátor, rozsah +/- 1000", Výrobce Moller- Wedel, Německo
EURAMET	European Collaboration in Measurement Standards (Evropská spolupráce v metrologii)
ČSN	Česká technická norma
ČSN P ENV 13005	Pokyn pro vyjádření nejistoty měření
AK	Autokolimátor
GMÚ	Generátor malých úhlů
SKS	Středisko kalibrační služby

1. Úvod

Každý strojírenský podnik se snaží nabízet své produkty v co nejvyšší kvalitě a samozřejmě s co nejmenšími náklady na výrobu. K tomu je nutné mít zavedenou politiku jakosti a kontrolu, která bývá často odvozena např. od ISO 9001 nebo v případě zkušebních a kalibračních laboratoří ISO/IEC 17025. V takovýchto podmínkách je tedy nutné, aby bylo zajištěno, že na prostředky, kterými je kvalita kontrolována, tedy měřidla, byl dostatečný spoleh. Potřebujeme tedy vědět, že měřený rozměr má opravdu hodnotu, kterou nám měřidlo ukazuje. K tomu, aby bylo zjištěno, jak je měřidlo přesné a spolehlivé, slouží jeho kalibrace.

Kalibrace je člověku vlastní již od starověku. Trest smrti hrozil tomu, kdo zapomněl nebo zanedbal svoji povinnost zkalibrovat své měřidlo délky při každém úplňku. Takové bylo riziko královských architektů odpovědných za budování chrámů a pyramid pro faraony ve starém Egyptě tři tisíce let před naším letopočtem [10]. Může nám sice připadat, že jsme prostorově i časově velice vzdáleni od těchto prvopočátků, nicméně lidé od té doby vždy kladli velký důraz na správné měření.

Vzhledem k potřebě udržet krok s ostatními vyspělými státy, co se týče přesnosti kalibrací a dosahovaných CMC, je nutné provést důkladnou analýzu kalibrací prováděných v oboru rovinných úhlů. Z nich poté učinit závěry a případně také navrhnout řešení pro změnu způsobů kalibrace a zvýšení její přesnosti, snížení CMC a tím udat směr, jakým by se měl vývoj v této oblasti dále ubírat.

Aby bylo možno zpřesnit kalibraci elektronických libel a autokolimátorů je třeba navrhnout nový způsob. Tímto problémem se zabývá předkládaná bakalářská práce. Je nezbytné v první řadě shrnout dosavadní zkušenosti práce s elektronickými libelami a autokolimátory (ČMI OI v Liberci). Na základě rešerše kalibrace elektronických libel a autokolimátorů i metodiky vyjádření jejich nejistot měření bude v práci podán návrh nového vyhodnocení jejich nejistoty měření. V závěrečné části je představeno celkové vyhodnocení, které shrnuje dosažené výsledky.

Cíle prezentované práce lze shrnout do následujících bodů:

- Navrhnout nový způsob kalibrace elektronických libel a autokolimátorů
- Experimentálně ověřit správnost koncepce nové metody pro konkrétní případy kalibrací. Ověřování bude provedeno prostřednictvím statistických metod.
- Celkově vyhodnotit dosažené výsledky.

Předložená práce předpokládá, že myšlenky zde formulované, stejně jako pořízená dokumentace vyhodnocení, budou moci být využity pro stanovování nejistot kalibrace elektronických libel a autokolimátorů v ČMI OI v Liberci, pro který byla tato práce zpracována.

2. Základní pojmy vztahující se k dané problematice

(Pro konzistentnost je třeba přijmout názvosloví základních pojmů.)

Kalibrace

Kalibrace je soubor činností, kterými se za specifikovaných podmínek stanoví vztah mezi hodnotami veličin, které jsou indikovány měřicím systémem, měřicím přístrojem, hodnotami reprezentovanými ztělesněnou mírou nebo referenčním materiálem a odpovídajícími hodnotami, které jsou realizovány etalony [1].

Vystavuje se kalibrační certifikát a (ve většině případů) připevňuje se štítek na kalibrované měřidlo. Na základě těchto informací může uživatel určit, zda je přístroj vhodný pro danou aplikaci [10].

Existují tři důvody, proč je třeba přístroje kalibrovat :

- Zajistit, aby údaje uváděné přístrojem byly konzistentní s jiným měřením.
- Stanovit správnost údajů uváděných přístrojem.
- Zjistit spolehlivost přístroje, tj. zda je možno se na něj spolehnout [10].

Kalibrací přístroje lze dosáhnout následujících skutečností :

- Výsledek kalibrace umožní buď přiřazení hodnot měřených veličin k indikovaným hodnotám, nebo stanovení korekcí vůči indikovaným hodnotám.
- Kalibrace může rovněž určit další metrologické vlastnosti, jako je účinek ovlivňujících veličin.
- Výsledek kalibrace lze zaznamenat v dokumentu, který se nazývá kalibrační list [3].

Etalony

Etalon měřicí jednotky anebo stupnice určité veličiny je měřidlo sloužící k realizaci a uchování této jednotky nebo stupnice a k jejímu přenosu na měřidla nižší přesnosti.

Podskupinou kategorie etalonů jsou hlavní etalony – tyto etalony tvoří základ

návaznosti měřidel u subjektů [9].

Státní etalon je etalon, uznaný oficiálním (národním) rozhodnutím k tomu, aby sloužil v dané zemi jako základ pro stanovení hodnot jiných etalonů dané veličiny.

Kompetentním orgánem schvalujícím státní etalony České Republiky je ÚNMZ. České státní etalony uchovává zpravidla ČMI, ale ÚNMZ tím může pověřit i další subjekty. Děje se tak v případech, kdy je vhodné využít disponibilní (k dispozici) vybavení, vědecké kapacity a podobně.

Laboratoře uchovávající státní etalony jsou zpravidla také zodpovědné za prezentaci nejlepších schopností kalibrace a měření.

O uchovávání a rozvoj státních etalonů pečují jejich garanti, jmenovaní ředitelem ČMI. V přehledech, uvedených výše, jsou etalony seřazeny do skupin podle členění oborů, které se používá ve sdružení EURAMET. Pro každý obor je jmenována tzv. kontaktní osoba [1].

Přehled státních etalonů ČR a etalonů ČMI :

Číselné označení etalonu obsahuje kód, který charakterizuje postavení etalonu:

- ECM – schválený a vyhlášený etalon ČR;
- ECR – etalon ČMI, referenční pro ČR;
- EPR – referenční etalon, uchovávaný pověřenou laboratoří;
- ETR – etalon ČMI;

Měřidla

Měřidla slouží k určení hodnoty měřené veličiny. Spolu s nezbytnými pomocnými měřícími zařízeními. Člení se na [9]:

- etalony
- pracovní měřidla stanovená (dále jen "stanovená měřidla")
- pracovní měřidla nestanovená (dále jen "pracovní měřidla")
- certifikované referenční materiály a ostatní referenční materiály, pokud jsou určeny k funkci etalonu nebo stanoveného nebo pracovního měřidla.

Etalon měřicí jednotky (anebo stupnice) určité veličiny je měřidlo sloužící k realizaci a uchovávání této jednotky (nebo stupnice) a k jejímu přenosu na měřidla nižší přesnosti. Uchováváním etalonu se rozumí všechny úkony potřebné k zachování metrologických charakteristik etalonu ve stanovených mezích.

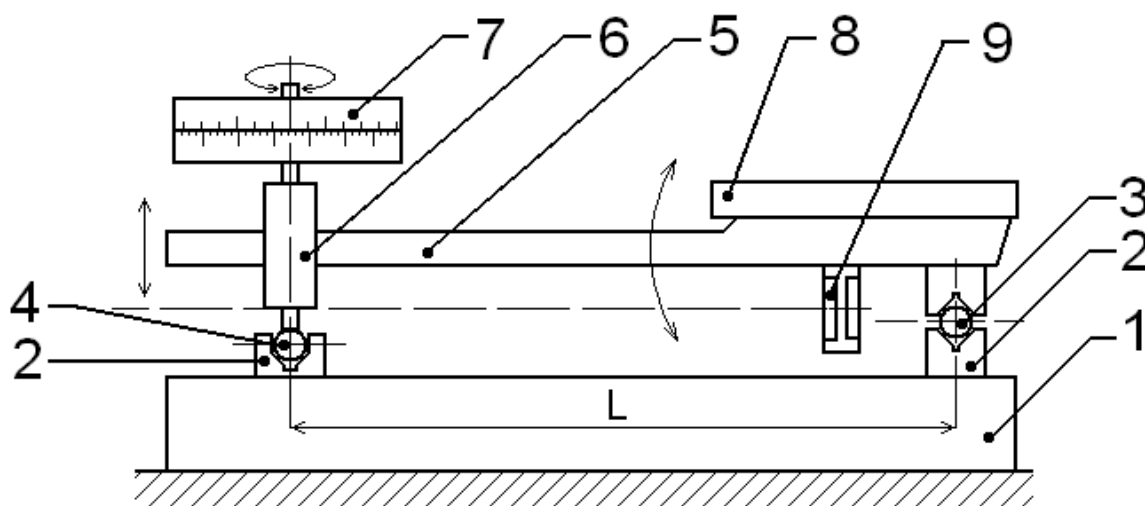
Stanovená měřidla jsou měřidla, která Ministerstvo průmyslu obchodu stanoví vyhláškou k povinnému ověřování s ohledem na jejich význam.

Pracovní měřidla jsou měřidla, která nejsou etalonem ani stanoveným měřidlem.

Certifikované referenční materiály a ostatní referenční materiály jsou materiály nebo látky přesně stanoveného složení nebo vlastností, používané zejména pro ověřování nebo kalibraci přístrojů, vyhodnocování měřících metod a kvantitativní určování vlastností materiálů [9].

Generátor malých úhlů

Generátor malých úhlů (dále jen GMÚ) je takový přístroj, který se používá na zkoušení jiných přístrojů (libel, autokolimátorů) na malé úhly. Zjednodušené schéma GMÚ je graficky vyjádřeno na obrázku 1 [7].



Obr. 1 Generátor malých úhlů

Na obrázku je schéma GMÚ klasické konstrukce. Na základní desce (1) jsou

upevněné ložiskové bloky (2) na uložení válečků (3) a kuličky (4). Válečky a kulička mají stejné jmenovité průměry. Rameno GMÚ (5) má na jednom konci přesný mikrometrický šroub (6), kterého poloha se odečítá na stupnici bubínku (7). Stupnice závitů mikrometrického šroubu (6) je volená tak, aby vzhledem na základní desku GMÚ L jedné otáčky šroubu odpovídala celistvá hodnota generovaného úhlu. Na rameni (5) je kromě toho kalibrační stoleček (8), na který se pokládá zkoušená libela. Kromě toho je pohyblivé rameno GMÚ vybavené rovinným zrcátkem (9), které se uplatní při zkoušení autokolimátoru.

Bubínek (7) je opatřen stupnicí přímo v jednotkách rovinného úhlu, přičemž kvůli zlepšení odčítání je možné ještě použít nonius nebo odčítací mikroskop [7].

Autokolimátor

Autokolimátor (autokolimační dalekohled) je optický přístroj, který má funkci kolimátoru i dalekohledu. Kolimátor představuje dalekohled zaostřený na nekonečno, který má místo okuláru světelný zdroj, dávající po přechodu objektivem rovnoběžný svazek světelných paprsků.

Konstrukce a použití autokolimátorů jsou založené na dvou základních optických principech [7]:

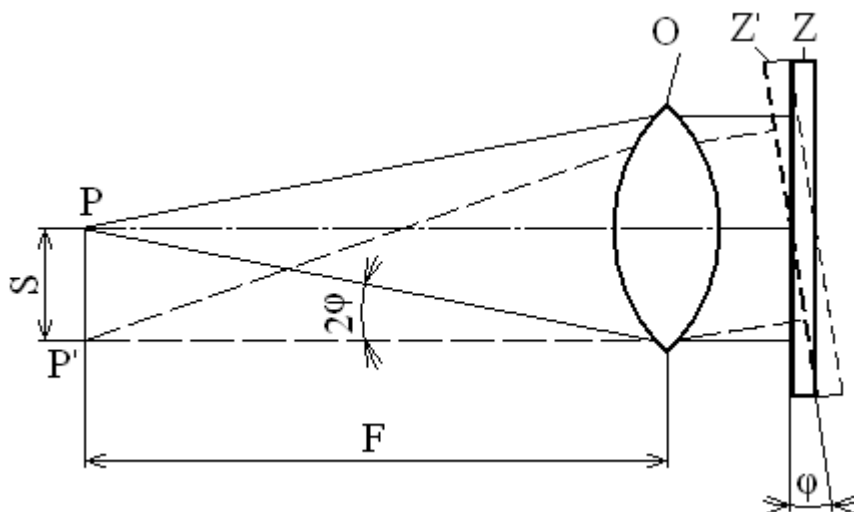
- Kolimace svazku světelných paprsků, které vycházejí z bodového světelného zdroje v ohniskové rovině
- Odraz rovnoběžného svazku světelných paprsků v rovinném zrcadle

Tyto dva základní principy společně vytvářejí princip autokolimátoru, který je graficky znázorněn na obrázku 2.

Předmět P (bodový zdroj světla) leží v ohniskové rovině objektivu O, který má ohniskovou vzdálenost F. Když před objektiv O, z kterého vychází rovnoběžný svazek světelných paprsků, postavíme kolmo na optickou osu rovinné zrcadlo Z, zobrazí se předmět P po odrazu svazku světelných paprsků na zrcadle Z opět ve stejném místě ohniskové roviny. Když nakloníme zrcadlo Z do polohy Z' (tj. o úhel φ), zobrazí se předmět P zase do ohniskové roviny objektivu, jenže tentokrát do bodu P', který je posunutý vůči P o vzdálenost S. Z grafického vyjádření na obrázku 2 je zřejmé, že úhel mezi dopadajícím a odraženým světelným paprskem je roven 2φ . Na

základě toho můžeme napsat základní rovnici autokolimátoru (s uvážením skutečnosti, že úhel φ je dostatečně malý – obvykle 30') [7].

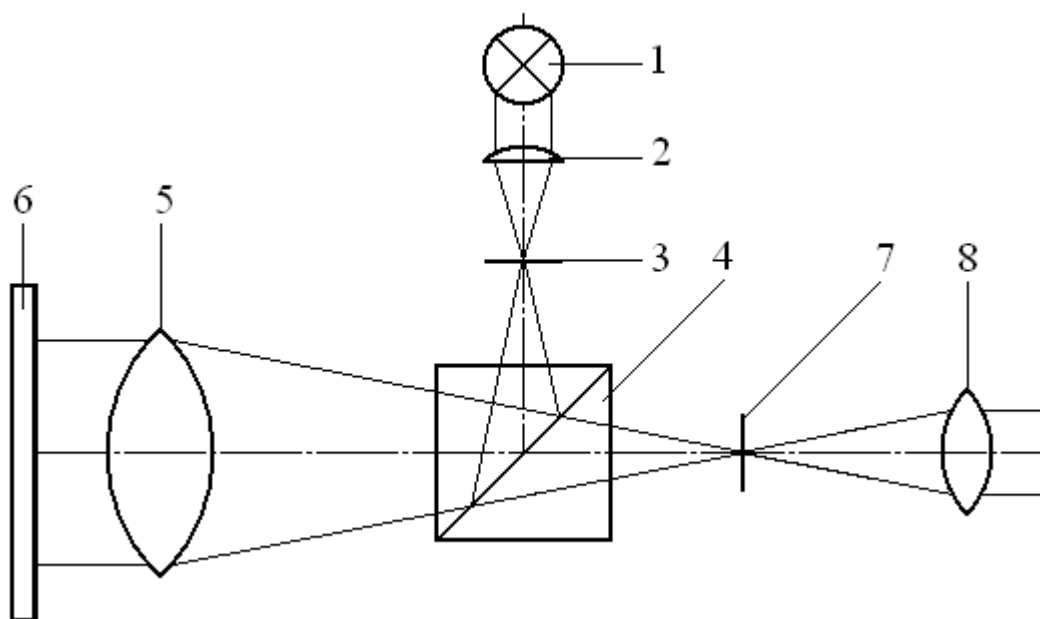
$$\varphi = \frac{S}{2F}. \quad (2.1)$$



Obr. 2 Princip autokolimátoru

Kromě popsané jednoduché autokolimace se na speciální účely používá i násobná autokolimace, při které se mezi zrcadlo a objektiv vkládá doplňkové polopropustné zrcadlo. Tím se získají další autokolimační obrazy, které umožňují zvýšit citlivost celé metody.

Autokolimátory se všeobecně rozdělují na dvě hlavní skupiny: vizuální a fotoelektrické. Klasifikačním znakem je zde způsob měření posunu autokolimačního obrazu (hodnota S na obrázku 2), tj. vizuální (subjektivní) nebo fotoelektrický (objektivní). Funkci vizuálního autokolimátoru lze vysvětlit na zjednodušeném schématu graficky znázorněného na obrázku 3 [7].

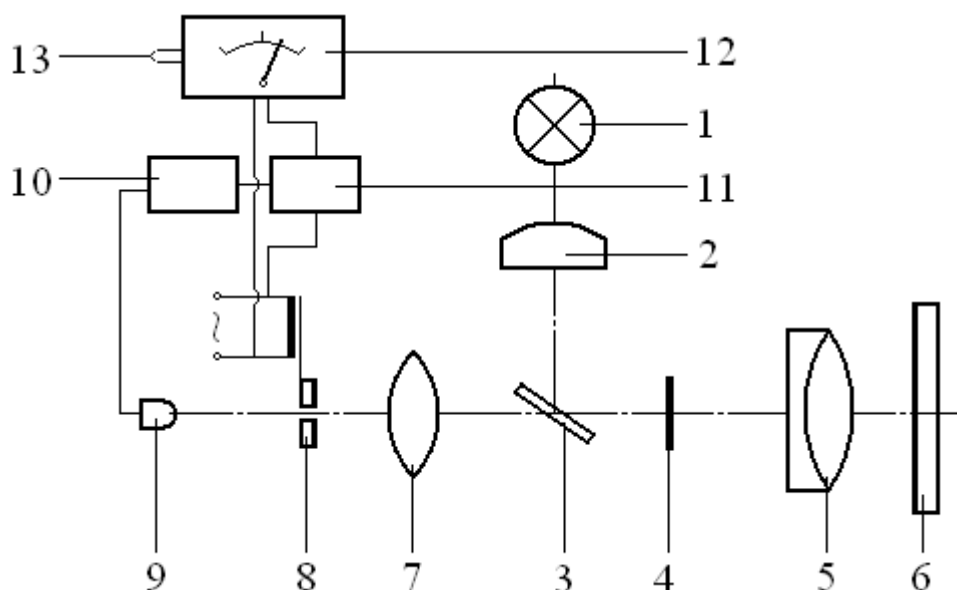


Obr. 3 Schéma vizuálního autokolimátoru

Světlo ze zdroje (1) přejde přes kondenzorovou soustavu (2) a osvítí destičku (3), na které je zaměřovací značka (kříž, stupnice apod.). Značka se promítne po odrazu na polopropustné vrstvě dělicí kostky (4) přes objektiv autokolimátoru (5) do nekonečna. Když postavíme před objektiv (5) rovinné odrazové zrcadlo (6), tehdy svazek světelných paprsků (kolimovaný svazek) se odrazí na zrcadle (6) a po přechodu objektivem (5) a dělicí kostkou se promítne do roviny optického zaměřovacího kříže (7). Kolimovaný svazek světelných paprsků je nositelem obrazu zaměřovací značky (3), který můžeme pozorovat společně se zaměřovacím křížem (7) přes optickou postavu čočky (8). Zaměřovací kříž musí samozřejmě ležet v ohniskové rovině objektivu (5) i čočky (8). Když skloníme zrcadlo (6) o určitý uhel, posune se obraz zaměřovací značky (3) o vzdálenost (hodnota S z obr. 2), která je úměrná úhlu sklonu zrcadla. Aby byla tato vzdálenost měřitelná, je zaměřovací značka (3) vyhotovená jako stupnice, nebo destička se zaměřovacím křížem (7) je spojena s mikrometrickým šroubem, opatřeným bubínkem s dělením v jednotkách rovinného úhl.

Protože vizuální autokolimátory nesplňovaly nejvyšší nároky na přesnost měření malých úhlů, hledali se možnosti na zvýšení přesnosti a objektivizaci určení polohy autokolimačního obrazu. Vhodným řešením je aplikace fotoelektrického

mikroskopu v autokolimátoru, čímž se získá fotoelektrický autokolimátor. Zjednodušené schéma fotoelektrického autokolimátoru je graficky znázorněno na obrázku 4 [7].



Obr. 4 Schéma fotoelektrického autokolimátoru

Světlo zdroje (1) přechází přes kondenzor (2) na polopropustné zrcadlo (3), od kterého se odráží tak, že osvítí zaměřovací destičku se štěrbinou (4) a dále se promítne přes objektiv (5) jako kolimovaný svazek světelných paprsků na zrcadlo (6). Po odrazu na zrcadlu (6) se svazek světelných paprsků vrací přes objektiv (5), zaměřovací destičku (4) a polopropustné zrcadlo (3) a mikroobjektiv (7), který ho promítne přes ohniskovou rovinu – rovinu vibrující štěrby (8) – na fotoelement (9). Elektrický signál z fotoelementu je vedený přes diskriminátor (10) do zesilovače (11), odkud po zesílení přechází na ovládání vibrátoru (8), což způsobí změnu střední polohy vibrující štěrby. Intenzita signálu se dále indikuje na analogovém přístroji (12), nebo se dále zaznamenává digitálním voltmetrem (13). V případě rovnovážné polohy štěrby vůči autokolimátorovému obrazu je signál nulový a na indikačním přístroji (12) je ručička v nulové poloze. To odpovídá přesnému zaměření autokolimátoru na zrcadlo (6). Když je rovnovážná poloha štěrby (8) vůči autokolimačnímu obrazu porušená, diskriminátor (10) rozliší směr a velikost změny, což se projeví výchylkou ručičky indikačního přístroje (12) [7].

Libely

Princip libely byl znám už ve starém Egyptě, kde se používala hladina kapaliny v otevřené trubici při vodohospodářských a stavebních pracích.

Libely můžeme rozdělit na dvě hlavní skupiny: kapalinové a kyvadlové (elektronické) libely. Všechny libely v podstatě fungují na základě působení zemské gravitace a mohou plnit dvě základní funkce [7].

- Ustavení roviny do horizontální polohy
- Měření malých úhlů a měření odchylek od horizontální polohy

Kapalinová libela se v nejjednodušší formě skládá z libelové trubice, smontované pevně nebo nastavitelně do tělesa libely jak je fotograficky znázorněno na obrázku 5. Libelová trubice je skleněná nádobka válcového tvaru, která je na jednom konci zatavená. Vnitřní povrch trubice je obvykle broušení do tvaru soudku. Libelová trubice se plní vhodnou čirou kapalinou tak, že po zatavení zůstane v trubici malá bublina, která obsahuje páry plnicí kapaliny. Bublina má funkci indexu, kterého poloha vůči stupnici, podélně vyryté na vnějším povrchu trubice, udává horizontální směr. Hodnota dílku stupnice je 2 mm.

Samotná libelová trubice je nevhodná na používání ve funkci úhlového měřidla, a proto se montuje do tělesa libely.

Vztah mezi hodnotou dílku stupnice d a poloměrem výbrusu libelové trubice R určuje nejdůležitější parametr libely – citlivost. Protože hodnota d je konstantní, citlivost T je funkcí poloměru R [7].

$$T = \frac{d}{R}. \quad (2.2)$$

Citlivost se vyjadřuje v jednotkách rovinného úhlu, nebo (což však není příliš přesné) jako poměr mm/m.

Průmyslově vyráběné libely jsou různé, např. příložné, rámové, nasazovací, závěsné, křížové atd..

Kvůli vysokému koeficientu roztažnosti plnicí kapaliny jsou libely velmi citlivé na změny teploty, což se nepříznivě projevuje na stabilitě jejich citlivosti. Proto se hledaly cesty, jako tento nepříznivý vliv eliminovat. Jedním řešením je vytvoření zvláštní přihrádky v tělese trubice, čímž vznikne komůrka na regulaci délky bubliny

podle momentální teploty. Druhé řešení je s kompenzačním tělesem (tyčinkou) z vhodného materiálu, které kompenzuje vlivy změn teploty na délku bubliny (v určitém rozsahu teplot se nemění). Kompenzační libely se používají např. na úhlové přístrojích v astronomii [7].



Obr. 5 Kapalinová libela [4]

Kromě kapalinových trubicových libel existují tzv. sférické libely fotograficky znázorněné na obrázku 6. Trubice je nahrazená nádobkou válcovitého tvaru (na spodní straně zatavenou) s přitmeleným krycím sklíčkem tvaru kulového vrchlíku. Na horní straně krycího sklíčka je kruhový index. Sférické libely se používají zejména jako hrubé pomůcky na horizontálním podstavci jiných úhlových přístrojích [7].



Obr. 6 Příklady sférických libel [5]

Libely s rozšířeným rozsahem měření sklonu jsou vyhotovené jako mikrometrické nebo koincidenční. Mikrometrické libely mají libelovou trubici uloženou v rámu, který je upevněn ve vertikální rovině mikrometrickým šroubem. Tím se

výrazně zvyšuje rozsah měření (až do 2°). Koincidenční libely mají kromě rámu s mikrometrickým šroubem hranolový systém na zlepšení indikace střední polohy bubliny.

Osobitý typ kapalinové libely byl vyvinut pro horizontální servosystémy. Jde o elektrolytickou libelu, která má v trubici zapuštěné tři platínové elektrody. Posun bubliny v trubici způsobuje změnu elektrického odporu mezi vnitřními s vnějšími elektrodami, která se indukuje na analogovém přístroji. Její hlavní výhodou je značná stabilita a dlouhá životnost.

Kyvadlová libela znázorněna na obrázku 7 se svojí konstrukcí podstatně liší od kapalinové libely. Hlavní část tvoří speciálně uložené kyvadlo, kterého poloha vůči tělesu libely je závislá od polohy roviny, na které je libela uložena, protože kyvadlo při změnách polohy nezůstane v pokoji, musí se vhodným způsobem tlumit (kapalinou, elektromagneticky apod.). Libela indukuje odchylku kyvadla vůči tělesu libely opticky i pomocí diferenciálního transformátoru [7].



Obr. 7 Elektronická kyvadlová libela [6]

3. Nejistoty měření

(Tato kapitola uvádí současný přehled hlavních přístupů k vyhodnocování nejistot)

Pojem nejistota měření je definován v ČSN 01 0115 jako parametr přidružený k výsledku měření charakterizující rozsah hodnot, které je možno důvodně přiřadit k měřené veličině.

Jinými slovy: Nejistota měření určuje interval okolo výsledku měření, ve kterém leží (s určitou pravděpodobností) pravá hodnota veličiny. Neboli pravou hodnotu veličiny sice nelze určit, ale lze ji stanovit (pomocí nejistoty) intervalem "od – do", ve kterých bude pravděpodobně ležet [8].

3.1 Způsoby vyhodnocování nejistoty měření

Na počátku vyhodnocení nejistoty měření stojí detailní pochopení podstaty tohoto měření, které bývá popsáno tzv. modelem měření. Nejistoty měření se skládají z několika dílčích složek. Ke stanovení jejich velikosti se užívají podle ČSN P ENV 13005 dva základní způsoby (typy) stanovení nejistoty [8]:

- **způsob A** vyhodnocení standardní nejistoty měření (statistické zpracování naměřených údajů);
- **způsob B** vyhodnocení standardní nejistoty měření (jiné než statistické zpracování naměřených údajů).

V normě ČSN P ENV 13005 jsou pak definovány druhy nejistoty:

- standardní nejistota;
- kombinovaná nejistota;
- rozšířená nejistota.

3.1.1 Výpočetní stanovení nejistoty měření způsobem A

Dle definice je nejistota typu A stanovena výpočtem z opakovaně provedených měření dané veličiny. V praxi to znamená, že pokud provedeme opakovaný odečet hodnoty neměnné měřené veličiny a máme k dispozici měřicí přístroj s dostatečným rozlišením, nevyhneme se jistému rozptylu naměřených hodnot.

Předpokládáme, že během tohoto opakovaného měření se nemění ani daná měřená veličina, ani ovlivňující veličiny, které na naše měření působí. Dále je v definici uvedeno, že mírou nejistoty typu A je výběrová směrodatná odchylka výběrového průměru. (Výběrová odchylka proto, že naměřené hodnoty x představují určitý malý výběr z prakticky neomezeného množství hodnot, kterých veličina může nabývat. Výběrového průměru proto, že hodnota, která se uvádí jako výsledek měření, se získá výpočtem průměrné hodnoty opakovaně provedených odečtů.).

Tomuto matematickému popisu také odpovídá příslušný vztah pro výpočet nejistoty typu A [8]:

$$u_A \approx s \approx \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (2.3)$$

kde platí:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (2.4)$$

Pro platnost tohoto vztahu je nutné, aby počet odečtených měření byl větší než 10 ($n \geq 10$), ze kterých se nejistota typu A vypočítá. Není-li možné dodržet tuto podmínku, je nutno provést doplňkovou korekci pro zohlednění malého počtu opakovaných měření[8].

3.1.2 Výpočetní stanovení nejistoty měření způsobem B

Postup pro stanovení standardní nejistoty typu B je založen na stanovení nejistoty jiným než statistickým vyhodnocením série pozorování. V tomto případě vychází stanovení nejistoty z určitých odborných znalostí a racionálního úsudku pracovníka, který měření provádí a nejistoty následně vyhodnocuje. Tyto nejistoty

mohou být odvozeny na základě [8]:

- údajů a zkušeností z dříve provedených měření;
- zkušeností s chováním a vlastnostmi příslušných materiálů a měřicího vybavení, popřípadě jejich obecné znalosti;
- údajů výrobce měřicí techniky;
- údajů uváděných v kalibračních listech;
- nejistot referenčních údajů převzatých s příruček.

Při určování nejistoty metodou typu B se vychází z dílčích nejistot jednotlivých zdrojů $u_B(z_j)$. Je-li známa maximální odchylka j - tého zdroje nejistoty $z_{j \max}$, určí se nejistota $u_B(z_j)$ podle následujícího vztahu [8]:

$$u_B(z_j) \approx \frac{z_{j \max}}{k} \quad (2.5)$$

Kde k je součinitel vycházející ze zákona rozdělení, kterým se příslušný zdroj nejistot řídí, takže např. pro normální (Gaussovo) rozdělení je $k = 2$, popř. 3, pro rovnoměrné rozdělení $k = 1,73$ atd..

V některých případech však může být známa již přímo hodnota standardní nejistoty $u_B(z_j)$ (např. z kalibračního listu měřidla).

Výsledná nejistota se určí metodou B pro p zdrojů $z_1, z_2, \dots, z_j, z_p$ dle následujícího vztahu [8]:

$$u_B \approx \sqrt{\sum_{j=1}^p A_j^2 \cdot u_B^2(z_j)} \quad (2.6)$$

kde: $u_B(z_j)$ jsou nejistoty jednotlivých zdrojů,
 A_j jejich součinitele citlivosti.

Touto úpravou se nejistotě typu B dostává charakteru směrodatné odchylky a jako s takovou se s ní dále pracuje.

Použití rovnoměrného rozdělení představuje přiměřené statistické vyjádření nedostatečné znalosti vstupní (měřené) veličiny x , pokud o ní nejsou známy jiné informace, než jsou např. limity její variability.

Pokud ale víme, že pravděpodobnost výskytu hodnot v okolí středu intervalu hodnot je vyšší než pravděpodobnost výskytu hodnot v krajích intervalu, může být vhodnější použití trojúhelníkového nebo normálního rozdělení. Naopak, pokud je výskyt hodnot v mezích intervalu pravděpodobnější než ve středu intervalu, může být vhodnější použití U rozdělení [8].

3.2 Nejistota kombinovaná

V reálné praxi jen málokdy vystačíme s jedním typem nejistoty měření. Ve většině případů se stanovuje kombinovaná nejistota měření, která je výsledkem kombinace obou typů nejistoty měření A i B. Výsledná kombinovaná standardní nejistota výsledků měření (veličiny x) je geometrickým součtem nejistoty typu A a nejistoty typu B dle následujícího vztahu [8]:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}, \quad (2.7)$$

kde: $u_A(x)$ – standardní nejistota typu A,

$u_B(x)$ – standardní nejistota typu B.

Standardní kombinovaná nejistota u_c byla určena s pravděpodobností 68%, tj. pro koeficient rozšíření $k = 1$. Pro jinou pravděpodobnost se nejistota měření upraví vynásobením koeficientem rozšíření vhodného rozdělení (viz. níže) [8].

3.3 Nejistoty rozšířené

Jak již bylo v textu uvedeno, výše uvedeným postupem se získá standardní kombinovaná nejistota. Označení „standardní“ vyjadřuje, že při skládání této nejistoty byly použity hodnoty směrodatných odchylek. Za určitých podmínek je možno považovat rozdělení takto určené nejistoty za přibližně normální. Z toho je zřejmé, že takto vypočtená nejistota měření pokrývá asi 68 % možných variant výsledků. Jinými

slovy až 1/3 výsledků měření se může ocitnout mimo takto stanovené pásmo nejistot.

Z metrologického hlediska je taková situace nepřipustná, proto přistupujeme k vynásobení standardní nejistoty koeficientem rozšíření, který nám umožní získat pokrytí možných výsledků s vyšší pravděpodobností. V praxi se nejčastěji používá postup určení koeficientu rozšíření dohodou pro určitou odhadovanou pravděpodobnost pokrytí výsledku měření. Z paralely s normálním rozdělením jsou vžité dva základní koeficienty [8]:

- $k = 2$ pro pravděpodobnostní pokrytí přibližně 95%;
- $k = 3$ pro pravděpodobnostní pokrytí přibližně 99,7%.

Rozšířenou nejistotu vypočteme ze vztahu:

$$U = k \cdot u_c, \quad (2.8)$$

kde: k – koeficient rozšíření,

u_c – kombinovaná nejistota měření.

3.4 Nejlepší měřicí schopnost

Existují dva zajímavé pojmy, které jsou používány k pojmenování jistého druhu nejistoty měření skládajícího se ze specifických složek nejistot měření. Jedná se o „nejlepší měřicí schopnost“ (přeloženo z angličtiny „best measurement capability“ – dále jen BMC) a o „kalibrační měřicí schopnost“ (přeloženo z angličtiny „calibration and measurement capability“ – dále jen CMC). Zde jsou uvedené definice BMC a CMC a jejich porovnání [12]:

BMC – nejlepší měřicí schopnost

BMC je nejmenší nejistota měření, které může v rámci akreditace laboratoř dosahovat při provádění více či méně rutinních kalibrací téměř ideálních měřicích etalonů s cílem definovat, realizovat, uchovat či reprodukovat jednu či více jednotek dané veličiny nebo které může dosahovat při více či méně rutinně prováděných kalibracích téměř ideálních měřicích zařízení určených pro měření dané veličiny [12].

CMC – kalibrační a měřicí schopnost

CMC je nejvyšší úroveň kalibrace nebo měření běžně nabízených zákazníkům odpovídající pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 % [1].

CMC musí být :

- Dosahováno podle dokumentovaného postupu a stanoveného rozpočtu nejistot, to vše v rámci systému managementu kvality národního metrologického institutu NMI (lépe řečeno signatáře CIPM MRA, kterým může být i přidružená laboratoř).
- Realizováno pravidelně, standardně.
- Musí být k dispozici všem zákazníkům (uživatelům) služby.

Pokud jde o stanovení nejistoty, zahrnují se příspěvky, odpovídající nejlepším měřidlům, která jsou k dispozici a jsou kalibrována v NMI. Neuvažují se příspěvky, vzniklé mimo okamžik kalibrace v NMI (například vliv dopravy).

Normálními podmínkami, vzpomenutými výše, se rozumí běžná služba, vyjmuty jsou situace, kdy se pracuje s nadstandardními, špičkovými měřidly nebo kdy má měření charakter vědeckého experimentu [1].

Tento zvláštní druh specificky vymezené nejistoty týkající se kalibrací a úkonů, které kalibraci zahrnují (např. následné ověřování měřidel spadající do oblasti legální metrologie). Netýká se tedy obecně měření a zkoušení, byť i zde byly v minulosti zaznamenány pokusy něco podobného zavést. Jedná se o konvenčně dohodnuté stanovení nejistoty měření laboratoře, tak aby tyto hodnoty byly vzájemně mezi laboratořemi poskytujícími stejné služby porovnatelné a aby bylo na první pohled jednoznačně patrné, jaká je úroveň příslušného metrologického pracoviště. Je zřejmé, že metrologické pracoviště vybavené lépe bude vykazovat u srovnatelných výkonů lepší (tedy v daném případě nižší) hodnoty CMC než metrologické pracoviště vybavené hůře. To znamená, že CMC je také informací, která má být jednoznačně přístupná zákazníkům příslušných metrologických pracovišť. Tato zásada je dodržována NMI a v případě akreditovaných kalibračních laboratoří, kde je BMC (BMC – používána pro účely akreditace) v přílohách osvědčení o akreditaci, které specifikují rozsah akreditovaných služeb poskytovaných kalibračními laboratořemi [12].

Nejlepší měřicí schopnost BMC je jeden z parametrů, které jsou používány

pro definování rozsahu akreditace akreditované kalibrační laboratoře. Dalšími faktory jsou fyzikální veličina, kalibrační metoda nebo typ kalibrovaných přístrojů a rozsah měření. Nejlepší měřicí schopnost je běžně vyjadřována v záznamech o akreditaci nebo v další dokumentaci, která doprovází buď rozhodnutí o akreditaci nebo osvědčení o akreditaci, které je často vydáváno jako průkaz akreditace, nebo v obou typech dokumentů. Nejlepší měřicí schopnost je jednou z podstatných informací, která může být nalezena v přehledech akreditovaných laboratoří, které jsou pravidelně vydávány akreditačními orgány a používány potenciálními zákazníky akreditovaných laboratoří pro posouzení jejich vhodnosti pro provedení určité kalibrace v laboratoři nebo mimo její prostory .

Vyjadřování nejlepší měřicí schopnosti vyžaduje harmonizaci z toho důvodu, aby mohly být porovnávány schopnosti různých kalibračních laboratoří a především laboratoří akreditovaných různými akreditačními orgány. Jako podpora této harmonizace, ve vazbě na definici v hlavním textu, jsou dále uvedena některá vysvětlení týkající se termínu nejlepší měřicí schopnost.

Definice nejlepší měřicí schopnosti v sobě zahrnuje i to, že v rámci své akreditace laboratoř není oprávněná deklarovat nižší nejistotu, než je její nejlepší měřicí schopnost. To znamená, že po laboratoři je požadováno uvádět větší nejistotu než je nejistota vztahující se k nejlepší měřicí schopnosti v těch případech, kdy je zjištěno, že skutečný proces kalibrace významně přispívá k nejistotě měření. Typicky tento příspěvek může pocházet od kalibrovaného přístroje. Je zřejmé, že skutečná nejistota měření nikdy nemůže být nižší než je nejlepší měřicí schopnost laboratoře.

Je nutné zdůraznit, že vzhledem k definici nejlepší měřicí schopnosti, je toto pojetí použitelné pouze na výsledky, u kterých se laboratoř odvolává na svůj statut akreditované laboratoře. Termín nejlepší měřicí schopnost tak má při striktním výkladu administrativní charakter a nemusí nutně odpovídat skutečné technické schopnosti laboratoře. Jestliže má laboratoř proto své vnitřní důvody, musí mít možnost požádat o akreditaci s vyšší nejistotou měření než jsou její technické možnosti. Mezi tyto vnitřní důvody obvykle patří ty případy, kdy reálná schopnost musí být udržována v tajnosti vůči externím zákazníkům, tj. např. v těch případech, kdy laboratoř provádí výzkumné a vývojové práce nebo poskytuje služby speciálním zákazníkům. Politika akreditačního orgánu musí umožňovat udělení akreditace na jakékoliv požadované úrovni, pokud je laboratoř schopná této úrovni dosahovat.

Posouzení nejlepší měřicí schopnosti je úkolem akreditačního orgánu. Odhad nejistoty měření, která definuje nejlepší měřicí schopnost, musí být proveden v souladu s postupem formulovaným v ČSN EN ISO/IEC 17020:2005 s výjimkou případů řešených předchozím odstavcem. Nejlepší měřicí schopnost musí být uváděna stejným způsobem, jako je to vyžadováno v kalibračních listech, tj. v podobě rozšířené nejistoty, v běžných případech s použitím koeficientu rozšíření $k=2$. (Pouze v těch výjimečných případech, kdy nemůže být předpokládáno normální rozdělení nebo je posouzení založeno na omezených údajích, musí být nejlepší měřicí schopnost uváděna tak, aby byla zajištěna pravděpodobnost pokrytí asi 95%.)

Pro stanovení nejlepší měřicí schopnosti musí být vzaty do úvahy všechny faktory významně přispívající k nejistotě měření. Pokud je známo, že některé příspěvky se mění buď s časem nebo se změnou jiné fyzikální veličiny, může být jejich stanovení založeno na předpokladu limitů možných změn, které se mohou za běžných pracovních podmínek projevit. Např. pokud je o pracovním etalonu známo, že podléhá změnám, je nutné při odhadu jeho příspěvku k nejistotě vzít do úvahy příspěvek vyplývající ze změn mezi následujícími kalibracemi.

V některých oborech může nejistota měření záviset na dalších parametrech, např. na frekvenci napětí použitého při kalibraci etalonu odporu. Tyto další parametry musí být uváděny spolu s příslušnou fyzikální veličinou a nejlepší měřicí schopností určenou pro tyto další parametry. Často to může být provedeno vyjádřením nejlepší měřicí schopnosti jako funkce těchto parametrů.

Nejlepší měřicí schopnost musí být za normálních okolností vyjadřována číselně. V těch případech, kdy nejlepší měřicí schopnost je funkcí příslušné veličiny (nebo libovolného jiného parametru), musí být vyjádřena v analytické podobě. Ovšem v tomto případě může být vyjádření pro ilustraci doplněno grafem. Vždy musí být naprosto zřejmé, zda je nejlepší měřicí schopnost vyjadřována v absolutním či relativním tvaru [11].

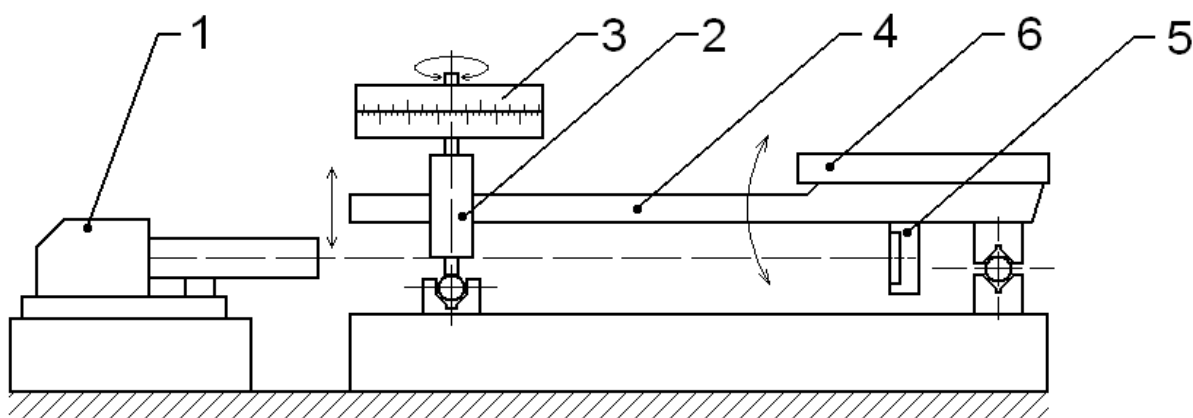
4. Metodika kalibrace elektronických libel a autokolimátorů

4.1 Způsoby kalibrace autokolimátorů

4.1.1 Současný způsob kalibrace autokolimátorů

Ke kalibraci autokolimátorů je v současné době používán jako etalon generátor malých úhlů. Jeho výhodou je, že má rozsah $\pm 200'$ [11] a lze na něm teoreticky měřit autokolimátor se stejně širokou stupnicí. Ve skutečnosti je rozsah nejčastěji měřených autokolimátorů $(0 - 10)'$ [11]. Nejsou to ovšem autokolimátory takové kvality jako jsou přístroje státního etalonu, ale nejistota kalibrací právě pomocí generátoru malých úhlů je čím dál tím vyšší. Přístroj je nestabilní při pohybu v obou směrech a nestabilita je již tak velká, že výrazně ovlivňuje výslednou nejistotu měření.

Princip kalibrace autokolimátorů pomocí generátorů malých úhlů je založen na pohyblivém rameni (4) jež se naklání pomocí mikrometrického šroubu (2) jak je graficky znázorněné na obrázku (8). Na konci ramene (4) je pevně umístěné zrcátko (5), které zajišťuje potřebný odraz paprsku autokolimátoru (1). Mikrometrický šroub (2) na sobě má stupnici (3), která měří náklon ramene (4) se zrcátkem (5) s rozlišením na $0,1''$. Během kalibrace se musí pohybovat ramenem (4) v obou směrech a při tom vykazuje generátor malých úhlů nestabilitu $0,6''$. Tato nestabilita je nejvýraznějším bodem při výpočtu konečné nejistoty měření a u kalibrace autokolimátorů s rozlišením stupnice přesnější než $1''$ [11] je tímto jejich přesnost částečně znehodnocena.



Obr. 8 Kalibrace autokolimátorů pomocí generátoru malých úhlů.

Legenda k obrázku:

- 1 Kalibrovaný autokolimátor
- 2 Mikrometrický šroub generátoru malých úhlů
- 3 Úhloměrná stupnice generátoru malých úhlů
- 4 Naklápěné rameno generátoru malých úhlů
- 5 Zrcátko umístěné na rameni
- 6 Kalibrační stoleček.

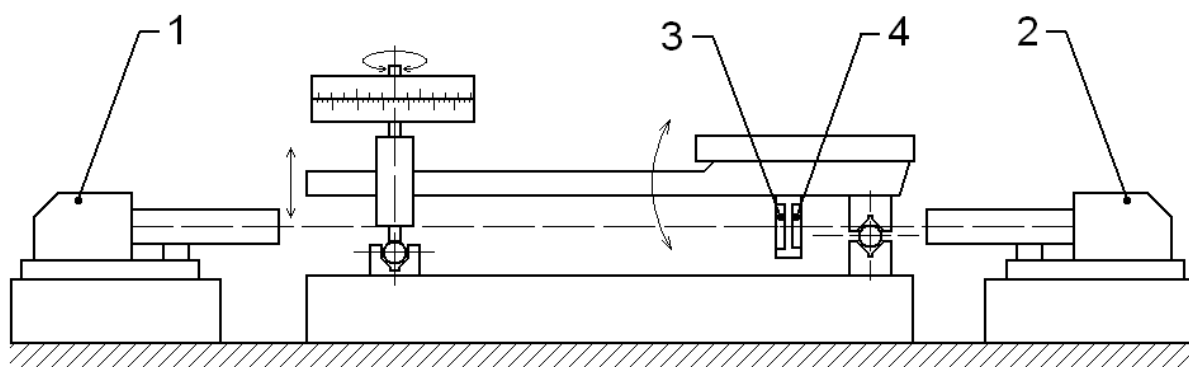
4.1.2 Návrh nového způsobu kalibrace autokolimátorů

Jelikož předchozí metoda není dostatečně přesná, začal se vyvíjet jiný způsob kalibrace autokolimátorů. Jedná se o metodu kalibrace autokolimátoru autokolimátorem státního etalonu jak je znázorněno na obrázku 9. Generátor malých úhlů je zde stále ovšem už pouze jako pomůcka pro naklápění zrcátek, od kterých je odražen paprsek autokolimátoru. Na ramenu generátoru malých úhlů je připevněno další stříbrné zrcátko takovým způsobem, že když se nakloní rameno přístroje, obě zrcátka se pootočí o shodný úhel. Na jedno zrcátko je namířem kalibrovaný autokolimátor a na druhé autokolimátor státního etalonu. Úhly naklopení jsou stále generovány pomocí původního přístroje, avšak měřeny jsou již mnohem přesněji částí státního etalonu. Tím je jednak zajištěno o řád a půl přesnější rozlišení stupnice a je také eliminována nestabilita měření přístroje při pohybu ramena oběma směry.

Původním cílem tohoto vývoje bylo zajištění rozšířené nejistoty měření $0,3''$. Současná data ukazují, že tato metoda byla již překonána a finální velikost rozšířené nejistoty měření bude nižší. Její velikost závisí ještě na několika měřeních a

výpočtech, které je nutno provést.

Při použití nové metody, kdy je etalonem autokolimátor státního etalonu, je možné teoreticky dosáhnout nejistoty měření BMC až $U = 0,03''$ [11]. Podmínky pro dosažení takovéto hodnoty jsou, že bude použit autokolimátor Elcomat 3000 a rozlišení stupnice měření $0,005''$ [11], jehož nejistota měření nepřesáhne $0,02''$ [11], budou započítány korekce, které byly změřeny při jeho kalibraci a uvažována bude i nejistota při interpolaci naměřených hodnot, které se pohybují mezi hodnotami, kde byl autokolimátor kalibrován.



Obr. 9 Kalibrace autokolimátorů autokolimátoru státního etalonu.

Legenda k obrázku:

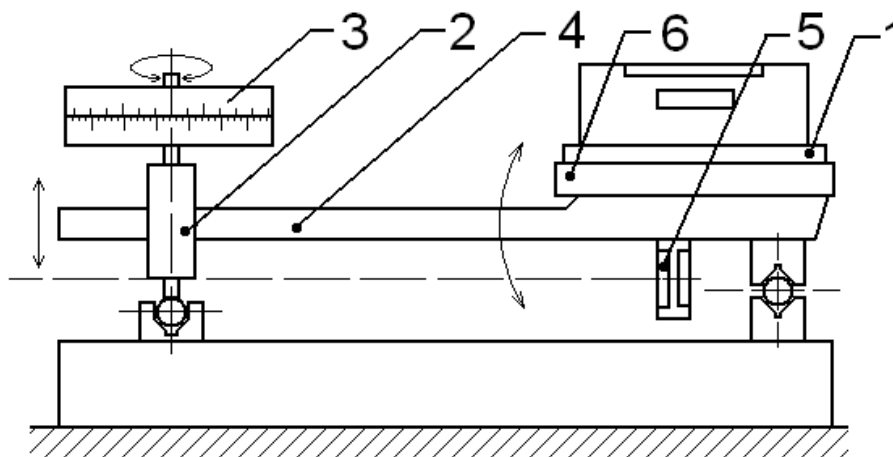
- 1 Kalibrovaný autokolimátor
- 2 Etalonový autokolimátor
- 3 Zrcátko odrážející paprsek kalibrovaného autokolimátoru
- 4 Zrcátko odrážející paprsek kalibrovaného autokolimátoru

4.2 Způsoby kalibrace libel

4.2.1 Současný způsob kalibrace Libel

Stejně jako je tomu u kalibrace autokolimátorů se u kalibrace libel používá jako etalon generátor malých úhlů graficky znázorněno na obrázku 10. Na mikrometrickém šroubu generátoru je stupnici odkud je odečítána hodnota sklonu. Na rozdíl od kalibrace autokolimátorů, kde se měří sklon zrcátka, je libela položena na rovinné desce naklápěcího stolečku, který je pevně uchycen na sklopném rameni přístroje. Pokud je teda ramenem otočeno o daný úhel, o stejný úhel se nakloní stůl s libelou a též obě zrcátka, používána při kalibraci autokolimátorů. Při tomto

způsobu měření nastává podobný problém jako při kalibraci autokolimátorů. Vlivem nízké přesnosti, nestability a velikosti rozlišení stupnice generátoru malých úhlů vzniká relativně velká nejistota měření. Při kalibraci starších typů libel, jako například strojních, koincidenčních, tento způsob stále vyhovuje, ovšem dnes jsou vyráběny převážně libely elektronické. Vezmeme-li v úvahu rozlišení stupnice generátoru malých úhlů a jeho nestabilitu měření, stává se tento prostředek, v případě kalibrace nejpřesnějších elektronických libel, již nevyhovující.



Obr. 10 Generátor malých úhlů pro kalibraci libel

Legenda k obrázku:

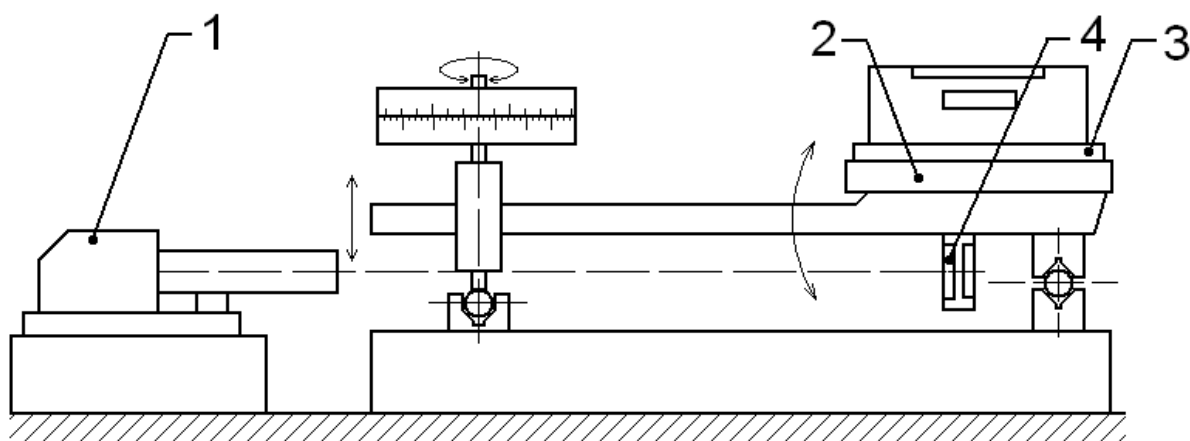
- 1 Kalibrovaná libela
- 2 Mikrometrický šroub generátoru malých úhlů
- 3 Úhloměrná stupnice generátoru malých úhlů
- 4 Naklápěné rameno generátoru malých úhlů
- 5 Zrcátko umístěné na rameni
- 6 Kalibrační stoleček.

4.2.2 Návrh nového způsobu kalibrace libel

Změna způsobu kalibrace je založena na podobném způsobu jako změna metody při kalibraci autokolimátorů. Je stále využíván generátor malých úhlů na jehož stolku je umístěna kalibrovaná libela, ale již ne jako etalon nýbrž pouze jako prostředek, který generuje požadovaný sklon libely. Pro měření úhlu naklopení je použit autokolimátor státního etalonu, který je zaměřen na zrcátko upevněné na rameni generátoru jak je graficky znázorněno na obrázku 11. Zrcátko i kalibrační stolek jsou na rameni upevněny tak, že velikost jejich natočení, při pohybu ramena,

je shodná. Tímto způsobem jsou eliminovány chyby přiměření hodnot úhlu pootočení na generátoru malých úhlů a je tedy dosaženo nejistoty nižší než $U = 0,3''$ při $k = 2$. Nevýhodou této metody je fakt, že s takto nízkou nejistotou měření je možné kalibrovat pouze libely s rozsahem maximálně $2100''$, což je maximální hodnota Autokolimátoru Elcomat 3000. Naopak jednou z výhod je, že na odečítacím zařízení autokolimátoru mohou být naměřeny hodnoty v různých jednotkách.

Vzhledem k tomu, že u libel bývá stupnice uvedena v rozmanitých jednotkách, lze na stupnici autokolimátoru nastavit takové jednotky aby se nám shodovaly s jednotkami na libele. Díky tomu se nemusí jednotky přepočítávat a omezí se tím možné vzniklé chyby a nepřesnosti při zaokrouhlování. Další výhodou je, že oba autokolimátory státního etalonu umožňují přímé propojení s počítačem a zaznamenávání hodnot do souboru. Tím je zamezeno vzniku chyby špatným odečtením nebo zapsání hodnoty z autokolimátoru.



Obr. 11 Kalibrace libel pomocí etalonového autokolimátoru

Legenda k obrázku:

- 1 Etalonový autokolimátor
- 2 Kalibrační stůlek generátoru malých úhlů
- 3 Kalibrovaná libela
- 4 Zrcátko odrážející paprsek autokolimátoru

Při použití této metody, kdy bude etalonem autokolimátor státního etalonu, lze teoreticky dosáhnout nejistoty měření BMC až $U = 0,03''$, stejně jako u kalibrace

autokolimátorů. Podmínky pro dosažení této metody jsou, že bude použit autokolimátor Elcomat 3000 s rozlišením stupnice měření $0,005''$, jeho nejistota měření nepřesáhne $0,02''$, budou započítány korekce, které byly změřeny při jeho kalibraci a uvažována bude i jeho nejistota při interpolaci naměřených hodnot, které se pohybují mezi hodnotami, kde byl autokolimátor kalibrován. Vzhledem k tomu, že autokolimátory jsou mnohem přesnější zařízení než libely a opakovatelnost jejich měření je vyšší, bude se CMC při kalibraci libel a autokolimátorů lišit tak, že CMC kalibrace autokolimátorů bude mít nižší hodnotu než CMC kalibrace libel i přes to, že hodnota jejich BMC je podobná.

Dalším rozšiřováním této metody bude rozšíření rozsahu kalibrace. Generátor malých úhlů je v současné době již vybaven dvěma zrcátky, která jsou připevněna na pohyblivém rameni přístroje. Celý měřicí systém tedy lze zapojit tak, že na kalibračním stolku generátoru bude umístěna měřená libela a na obě zrcátka budou zacíleny autokolimátory. Konec rozsahu prvního autokolimátoru bude nastaven tak, aby ve stejném místě začínal rozsah druhého autokolimátoru, přičemž je nutné, aby se rozsahy obou přístrojů po určitou dobu překrývaly. Tak bude zajištěna stabilita hodnot v místě přechodu z jednoho autokolimátoru na druhý. Zde musí být zaručeno, aby při opakovaném měření byly stupnice obou autokolimátorů překryty vždy ve stejných bodech, jinak by mohlo dojít ke skokovému posunu všech měřených hodnot v místě odečtu prvním a druhým přístrojem. Předpoklad je takový, že překrytí stupnic obou přístrojů bude při opakovaných měřeních vykazovat určité malé odchylky a ty budou přispívat ke zvýšení nejistoty měření. Při tomto způsobu kalibrace lze předpokládat, že dojde ke zvětšení rozsahu kalibrace téměř na dvojnásobnou hodnotu, zhruba na $4000''$.

5. Statistické vyhodnocování experimentu

Pro statistické zpracování dat byly použity následující matematické nástroje: aritmetický průměr, směrodatná odchylka.

Číselné charakteristiky základního statistického souboru byly získány bodovým odhadem (charakteristiku odhadneme jediným číslem, bodem) na základě definic číselných charakteristik náhodných veličin definovaných na náhodném výběru.

Bodovým odhadem střední hodnoty výběrového průměru $E(X)$ (i bodovým odhadem střední hodnoty náhodné veličiny X), byla pozorovaná hodnota výběrového průměru \bar{x} [2].

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

Při měření to byl aritmetický průměr z n - tice naměřených hodnot veličiny X .

Výběrová směrodatná odchylka je odmocnina z rozptylu, míra variability znaku ve statistickém souboru stejného rozměru jako znak, resp. míra variability náhodné veličiny stejného rozměru jako veličina [2].

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Nastavováno na AK	[']	["]	Naměřené hodnoty										Přepočítáno na vteřiny					x	s	Korekce GMÚ	Redukovaná korekce GMÚ	Započítaná korekce GMÚ	Odečten nominální úhel	Korekce ["]
			1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5							
0	0	tam	111	14,4	111	13,8	111	13,2	111	13,1	111	13,6	667,4	667,3	667,3	667,3	667,3	6673,78	0,426384	0,11	0	326,22	326,22	0
		zpět	111	13,5	111	14,1	111	13,9	111	14,2	111	14	667,3	667,4	667,3	667,2	667,2							
2	0	tam	109	13,4	109	13,3	109	13,4	109	13,5	109	14,3	655,3	655,3	655,3	655,3	655,3	6553,8	0,394405	0,11	0	446,2	326,2	0,02
		zpět	109	14,2	109	14,1	109	14,2	109	14	109	13,6	655,4	655,4	655,4	655,4	655,4							
4	0	tam	107	13,9	107	13,5	107	13,7	107	13,6	107	14,1	643,3	643,3	643,3	643,3	643,3	6434,16	0,474225	0,11	0	565,84	325,84	0,38
		zpět	107	14,2	107	14,6	107	14,6	107	14,6	107	14,8	643,4	643,4	643,4	643,4	643,4							
4	30	tam	106	43,6	106	43,1	106	43,8	106	44	106	44	640,3	640,3	640,3	640,3	640,3	6404,12	0,571159	0,11	0	595,88	325,88	0,34
		zpět	106	44,3	106	44,6	106	44,9	106	44,9	106	44	640,4	640,4	640,4	640,4	640,4							
4	35	tam	106	38,8	106	38,9	106	38,7	106	38,9	106	39,5	639,8	639,8	639,8	639,8	639,8	6399,33	0,466786	0,11	0	600,67	325,67	0,55
		zpět	106	39,7	106	39,4	106	40	106	39,8	106	39,6	639,7	639,7	639,7	639,7	639,7							
4	40	tam	106	33,5	106	33,5	106	33,9	106	33,3	106	34,1	639,3	639,3	639,3	639,3	639,3	6393,98	0,513809	0,11	0	606,02	326,02	0,2
		zpět	106	34,4	106	33,5	106	34,8	106	34,4	106	34,4	639,4	639,4	639,4	639,4	639,4							
4	45	tam	106	28,3	106	28,4	106	28,1	106	28,9	106	29,1	638,8	638,8	638,8	638,8	638,8	6389,13	0,676675	0,11	0	610,87	325,87	0,35
		zpět	106	29,6	106	29,4	106	29,8	106	29,8	106	29,9	638,9	638,9	638,9	638,9	638,9							
4	50	tam	106	23,5	106	23,6	106	23,9	106	23,8	106	23,9	638,3	638,3	638,3	638,3	638,3	6384,2	0,524934	0,11	0	615,8	325,8	0,42
		zpět	106	24,8	106	24,4	106	24,4	106	24,9	106	24,8	638,4	638,4	638,4	638,4	638,4							
4	55	tam	106	18,7	106	18,7	106	18,8	106	19,2	106	19	637,8	637,8	637,8	637,8	637,8	6379,09	0,341402	0,11	0	620,91	325,91	0,31
		zpět	106	19	106	19,1	106	19,6	106	19,1	106	19,7	637,9	637,9	637,9	637,9	637,9							
5	0	tam	106	13,4	106	13,8	106	14,5	106	13,8	106	14,3	637,3	637,3	637,3	637,3	637,3	6374,2	0,483046	0,11	0	625,8	325,8	0,42
		zpět	106	13,9	106	14,8	106	14,5	106	14,1	106	14,9	637,3	637,3	637,3	637,3	637,3							
6	0	tam	105	13,5	105	13,9	105	14,5	105	14,4	105	14,6	631,3	631,3	631,3	631,3	631,3	6314,41	0,406749	0,01	-0,1	685,69	325,69	0,53
		zpět	105	14,6	105	14,5	105	14,9	105	14,6	105	14,6	631,4	631,4	631,4	631,4	631,4							
8	0	tam	103	14,2	103	14,1	103	14,3	103	15,1	103	14,8	619,4	619,4	619,4	619,4	619,4	6194,7	0,46428	0,01	-0,1	805,4	325,4	0,82
		zpět	103	14,2	103	15,4	103	15	103	15,1	103	15,1	619,4	619,4	619,4	619,4	619,4							
10	0	tam	101	14	101	14,3	101	14,9	101	14,6	101	14,8	607,4	607,4	607,4	607,4	607,4	6074,57	0,377271	0,01	-0,1	925,53	325,53	0,69
		zpět	101	14	101	14,5	101	15,1	101	14,9	101	14,6	607,4	607,4	607,4	607,4	607,4							

Tabulka 1 Kalibrace autokolimátoru – současná metoda

6. Výsledky a hodnocení experimentu

6.1 Výpočet nejistoty elektronického autokolimátoru

6.1.1 Současný způsob

Pro výpočet nejistoty byla vybrána nejvyšší hodnota výběrové směrodatné odchylky vycházející z tabulky č. 1, která udává výsledky z provedených měření a výpočtů. V našem případě to byla hodnota $b_7 = 285''$, kde $s_7 = 0,676675''$. Tato hodnota byla dosazena do výpočtu jak pro hodnotu a_i , tak pro hodnotu a_0 . Tímto bylo zajištěno, že i při měření mezi libovolnými kalibrovanými body nemůže vzniknout horší nejistota.

Standardní nejistota:
$$u_{\phi_i} = \frac{s_{\max}}{\sqrt{n}}, \quad (4.1)$$

$$u_{\phi_i} = \frac{0,676675}{\sqrt{10}} = 0,21398 \cong 0,21''.$$

Nejistota GMÚ je dána přístrojem a byla opět počítána dvakrát.

$$u_{GMÚ} = 0,065''.$$

Nestabilita
$$u_{nest.} = 0,35''.$$

Kombinovaná nejistota je pak vektorovým součtem všech předešlých nejistot rozšířeno o 20% nedefinovaných vlivů (ty zahrnují např. různé chyby justáže, vlivy teploty, otřesů, etalonu atd.).

$$u = \sqrt{u^2_{\text{prv}} + u^2_{\text{dr}} + u^2_{\text{GMÚ}} + u^2_{\text{GMÚ}} + u_{\text{nest.}}^2} \cdot 1,2 \quad (4.2)$$

$$u = \sqrt{0,21^2 + 0,21^2 + 0,065^2 + 0,065^2 + 0,035^2} \cdot 1,2 = 0,562''$$

Rozšířená nejistota při koeficientu rozšíření byla tedy :

$$U = 2 \cdot u = 2 \cdot 0,562 = \underline{\underline{1,124''}}.$$

Nastavováno na AK	[']	["]		Naměřené hodnoty					x	s	Redukce	Přepoččet		Korekce
				1	2	3	4	5				[']	["]	
0	0	0	tam	266,96	266,9	266,56	266,45	266,73	266,735	0,1799537	0	0	0	0
			zpět	266,6	266,95	266,67	266,89	266,64						
2	0	0	tam	146,79	146,91	146,98	146,93	147,01	146,938	0,0892935	-119,797	1	59,797	0,203
			zpět	147,04	147,08	146,91	146,87	146,86						
4	0	0	tam	27,31	26,86	27,1	26,98	27,4	27,22	0,2040152	-239,515	3	59,515	0,485
			zpět	27,07	27,37	27,27	27,47	27,37						
4	30	30	tam	-2,61	-2,72	-2,93	-2,65	-2,59	-2,671	0,1816254	-269,406	4	29,406	0,594
			zpět	-2,71	-2,63	-2,39	-2,49	-2,99						
4	35	35	tam	-7,67	-7,5	-7,83	-7,73	-7,15	-7,616	0,2237658	-274,351	4	34,351	0,649
			zpět	-7,57	-7,88	-7,37	-7,73	-7,73						
4	40	40	tam	-12,68	-12,8	-12,56	-12,63	-12,52	-12,626	0,0793305	-279,361	4	39,361	0,639
			zpět	-12,6	-12,58	-12,58	-12,68	-12,63						
4	45	45	tam	-17,66	-17,91	-17,4	-17,65	-17,44	-17,574	0,1525487	-284,309	4	44,309	0,691
			zpět	-17,55	-17,6	-17,63	-17,45	-17,45						
4	50	50	tam	-22,93	-22,75	-22,58	-22,75	-22,73	-22,653	0,2166949	-289,388	4	49,388	0,612
			zpět	-22,33	-22,84	-22,84	-22,43	-22,35						
4	55	55	tam	-27,73	-27,76	-27,67	-27,36	-27,53	-27,651	0,1420837	-294,386	4	54,386	0,614
			zpět	-27,75	-27,8	-27,58	-27,78	-27,55						
5	0	0	tam	-32,68	-32,52	-32,66	-32,78	-32,33	-32,605	0,1968784	-299,34	4	59,34	0,66
			zpět	-32,92	-32,3	-32,77	-32,54	-32,55						
6	0	0	tam	-92,94	-92,56	-92,53	-92,11	-92,72	-92,637	0,2259326	-359,372	5	59,372	0,628
			zpět	-92,58	-92,73	-92,64	-92,7	-92,86						
8	0	0	tam	-212,22	-212,31	-212,22	-212,12	-211,86	-212,203	0,1766384	-478,938	7	58,938	1,062
			zpět	-212,34	-212,14	-212,14	-212,14	-212,54						
10	0	0	tam	-332,52	-332,53	-332,36	-332,42	-332,62	-332,533	0,1319133	-599,268	9	59,268	0,732
			zpět	-332,54	-332,78	-332,41	-332,46	-332,69						

Tabulka 2

Kalibrace Autokolimátoru – Návrh nového způsobu kalibrace autokolimátoru

6.1.2 Nový způsob

Pro výpočet nejistoty byla vybrána nejvyšší hodnota výběrové směrodatné odchylky vycházející z tabulky č. 2, která obsahuje výsledky z provedených měření a výpočtů. V našem případě to byla hodnota $s_8 = 360''$, kde $s_8 = 0,2259326''$. Tato hodnota byla dosazena do výpočtu jak pro hodnotu a_i , tak pro hodnotu a_0 . Tímto bylo zajištěno, že i při měření mezi libovolnými kalibrovanými body nemůže vzniknout horší nejistota.

Vliv rozptylu naměřených hodnot – nejistota typu A

Příspěvek k nejistotě se vypočítá podle vztahu :

$$u_a = \frac{s_{\max}}{\sqrt{n}},$$

kde s_{\max} je výběrová směrodatná odchylka a n je počet opakovaných měření

$$u_a = \frac{0,2259326}{\sqrt{10}} = 0,071446 \cong 0,0714'',$$

Vliv etalonu

U etalonu musí být uvedena rozšířená nejistota U a koeficient rozšíření k , z těchto hodnot je vypočítán příspěvek k nejistotě dle vztahu :

$$u_{b1} = \frac{U}{k}$$

Rozšířená nejistota etalonu $U = 0,02''$ a koeficient rozšíření $k = 2$. Z toho plyne :

$$u_{b1} = \frac{0,02}{2} = 0,01''$$

Vliv rozlišovací schopnosti

Rozlišovací schopnost je určena nejmenším desetinným číslem měřící stupnice přístroje nebo nejnižší hodnotou, kterou jsme schopni odečíst na analogové stupnici přístroje.

$$u_{b2} = \frac{R}{\sqrt{3}}, \quad (4.3)$$

kde R je rozlišovací schopnost měřidla.

Rozlišení stupnice při měření bylo $R = 0,005''$

$$u_{b2} = \frac{0,005}{\sqrt{3}} = 0,0029''$$

Vliv interpolace

Během měření se musí počítat s tím, že měřené hodnoty se budou nacházet mimo hodnoty, kde byl autokolimátor kalibrován. Vliv interpolace na nejistotu měření mezi těmito hodnotami určíme ze vztahu :

$$u_{b3} = \frac{u_{AK}}{\sqrt{3}} \quad (4.4)$$

Příspěvek k nejistotě z interpolace mezi hodnotami mezi kterými byl kalibrován autokolimátor :

$$u_{b3} = \frac{0,02}{\sqrt{3}} = 0,0115$$

Kombinovaná nejistota je pak vektorovým součtem všech předešlých nejistot rozšířeno o 20% nedefinovaných vlivů (ty zahrnují např. různé chyby justáže, vlivy teploty, otřesů, driftů, etalonu atd.).

$$u = \sqrt{u_a^2 + u_{b1}^2 + u_{b2}^2 + u_{b3}^2} \cdot 1,2$$

$$u = \sqrt{0,0714^2 + 0,01^2 + 0,0029^2 + 0,0115^2} \cdot 1,2 = 0,0877''$$

Rozšířená nejistota při koeficientu rozšíření byla tedy :

$$U = 2 \cdot u$$

$$U = 2 \cdot 0,0877 = \underline{\underline{0,175''}}$$

Jmenovitý úhel	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	Průměr	Redukce	s	Korekce
[μm/m]	[μm/m]	[μm/m]	[μm/m]	[μm/m]	[μm/m]	[μm/m]	[μm/m]	[μm/m]	[μm/m]	[μm/m]	[μm/m]	[μm/m]	[μm/m]	[μm/m]
-200	-192,7	-193,7	-194,6	-191,2	-190,7	-192,7	-193,7	-194,6	-191,2	-190,7	-192,58	-199,74	1,548332	0,3
-180	-172,8	-173,7	-174,8	-171,3	-170,9	-172,8	-173,7	-174,8	-171,3	-170,9	-172,7	-179,86	1,536229	0,1
-160	-154,3	-154,2	-154,2	-151,9	-151,3	-154,3	-154,2	-154,2	-151,9	-151,3	-153,18	-160,34	1,375015	-0,3
-140	-133,2	-133,5	-134	-131,8	-131,3	-133,2	-133,5	-134	-131,8	-131,3	-132,76	-139,92	1,088526	0,1
-120	-114	-113,5	-114,4	-111,3	-111	-114	-113,5	-114,4	-111,3	-111	-112,84	-120	1,488624	0
-100	-93,6	-93,8	-94,5	-91,1	-91,3	-93,6	-93,8	-94,5	-91,1	-91,3	-92,86	-100,02	1,464544	0
-80	-73,6	-73,8	-74,6	-71,9	-70,8	-73,6	-73,8	-74,6	-71,9	-70,8	-72,94	-80,1	1,459985	-0,1
-60	-52,7	-53,5	-54,6	-51,5	-51,1	-52,7	-53,5	-54,6	-51,5	-51,1	-52,68	-59,84	1,353842	0,2
-40	-32,4	-34	-34,4	-31,7	-30,7	-32,4	-34	-34,4	-31,7	-30,7	-32,64	-39,8	1,464544	0,2
-20	-12,8	-14,5	-14	-12,1	-11,1	-12,8	-14,5	-14	-12,1	-11,1	-12,9	-20,06	1,304692	-0,1
0	6,5	5,7	5,9	8,3	9,4	6,5	5,7	5,9	8,3	9,4	7,16	0	1,525487	0
20	26,5	26,4	25,5	28,3	29,1	26,5	26,4	25,5	28,3	29,1	27,16	20	1,400952	0
40	46,6	45,9	45,9	48,5	49	46,6	45,9	45,9	48,5	49	47,18	40,02	1,387884	0
60	66,6	65,6	65,6	68,4	69,1	66,6	65,6	65,6	68,4	69,1	67,06	59,9	1,522571	-0,1
80	86,8	85,6	86	88,5	89,2	86,8	85,6	86	88,5	89,2	87,22	80,06	1,479339	0,1
100	106,6	105,8	105,8	108,1	108,6	106,6	105,8	105,8	108,1	108,6	106,98	99,82	1,229995	-0,2
120	126,5	125,8	126,1	128,5	129	126,5	125,8	126,1	128,5	129	127,18	120,02	1,381465	0
140	146,7	145,7	145,8	148,3	149,1	146,7	145,7	145,8	148,3	149,1	147,12	139,96	1,433566	0
160	166,7	165,7	165,7	168,1	169,2	166,7	165,7	165,7	168,1	169,2	167,08	159,92	1,452048	-0,1
180	186,2	185,4	186,2	187,3	189	186,2	185,4	186,2	187,3	189	186,82	179,66	1,313858	-0,3
200	206,3	205,3	205,9	207,2	209,3	206,3	205,3	205,9	207,2	209,3	206,8	199,64	1,469694	-0,4

Kalibrace libel - Současná metoda

Tabulka 3

6.2 Výpočet nejistoty elektronické libely

6.2.1 Současný způsob

Pro výpočet nejistoty byla vybrána nejvyšší hodnota výběrové směrodatné odchylky vycházející z tabulky č. 3, která obsahuje výsledky z provedených měření a výpočtů. V našem případě to byla hodnota $b_1 = -200 \mu\text{m/m}$, kde $s_1 = 1,548332 \mu\text{m/m}$. Tato hodnota byla dosazena do výpočtu jak pro hodnotu a_i , tak pro hodnotu a_0 . Tímto byla zajištěna, že i při měření mezi libovolnými kalibrovanými body nemůže vzniknout horší nejistota.

Standardní nejistota $u_{b_1} = \frac{s_{\max}}{\sqrt{n}} = \frac{1,548332}{\sqrt{10}} = 0,4896 \approx 0,49 \mu\text{m/m}$,

Nejistota GMÚ je dána přístrojem a je opět počítána dvakrát.

$$u_{GMÚ} = 0,2425 \mu\text{m/m}$$

Nestabilita $u_{nest.} = 0,35 \sqrt{4,85} = 1,6975 \mu\text{m/m}$

Kombinovaná nejistota je pak vektorovým součtem všech předešlých nejistot rozšířeno o 20% nedefinovaných vlivů (ty zahrnují např. různé chyby justáže, vlivy teploty, otřesů, driftů, etalonu atd.).

$$u = \sqrt{u_{b_1}^2 + u_{b_1}^2 + u_{GMÚ}^2 + u_{GMÚ}^2 + u_{nest.}^2} \cdot 1,2$$

$$u = \sqrt{0,49^2 + 0,49^2 + 0,2425^2 + 0,2425^2 + 1,6975^2} \cdot 1,2 = 2,238 \mu\text{m/m}$$

Rozšířená nejistota při koeficientu rozšíření je tedy :

$$U = 2 \cdot u = 2 \cdot 2,238 = 4,476 \mu\text{m/m} \approx \underline{\underline{0,9221''}}$$

Jm.úhel	1.řada	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	Průměr	Redukce	s	Korekce
[μm/m]	[μm/m]	[μm/m]	[μm/m]	[μm/m]	[μm/m]	[μm/m]	[μm/m]	[μm/m]	[μm/m]	[μm/m]	[μm/m]	[μm/m]	[μm/m]	[μm/m]
-200	16,65	16,46	16,87	16,41	16,79	16,36	16,66	16,39	16,56	16,74	16,589	-199,713	0,1803	0,29
-180	36,38	36,39	36,49	36,56	36,48	36,5	36,45	36,49	36,38	36,52	36,464	-179,838	0,0624	0,16
-160	55,93	56,96	56,54	56,21	55,87	55,71	56,45	56,87	56,69	57,22	56,445	-159,857	0,5063	0,14
-140	76,39	76,45	76,24	76,41	76,4	76,12	76,38	76,46	76,41	76,41	76,367	-139,935	0,1054	0,06
-120	96,12	96,84	96,44	96,94	96,78	95,92	96,13	96,11	95,94	96,88	96,41	-119,892	0,4134	0,11
-100	116,38	116,39	116,22	116,42	116,51	116,42	116,45	116,45	116,42	116,38	116,404	-99,898	0,0756	0,1
-80	136,34	136,15	136,32	136,28	136,35	136,21	136,32	136,62	136,33	136,41	136,333	-79,969	0,1249	0,03
-60	156,11	156,21	156,26	156,34	156,33	156,4	156,25	156,28	156,28	156,27	156,273	-60,029	0,0783	-0,03
-40	176,32	176,12	176,19	176,42	176,51	176,54	176,38	176,41	176,48	176,39	176,376	-39,926	0,1343	0,07
-20	196,06	196,22	196,38	196,01	196,31	196,27	196,44	196,3	196,34	196,34	196,267	-20,035	0,1364	-0,03
0	216,27	216,26	216,38	216,22	216,27	216,24	216,33	216,27	216,36	216,42	216,302	0	0,0663	0
20	236,19	236,14	236,11	236,21	236,27	236,14	236,19	236,24	236,22	236,12	236,183	19,881	0,0538	-0,12
40	256,26	256,04	256,34	256,14	256,12	256,09	256,04	256,26	256,14	255,97	256,14	39,838	0,1158	-0,16
60	276,26	276,1	276,14	276,36	276,41	276,25	276,28	276,21	276,12	276,18	276,231	59,929	0,1017	-0,07
80	296,28	296,12	296,01	296,18	296,17	296,33	296,17	296,38	296,14	296,15	296,193	79,891	0,1085	-0,11
100	315,89	316,15	316,07	316,12	316,77	315,95	316,33	316,52	316,29	316,14	316,223	99,921	0,2656	-0,08
120	336,31	336,27	336,18	336,32	336	336,14	336,01	336,08	336,12	336,09	336,152	119,85	0,1161	-0,15
140	356,28	356,32	356,22	356,12	356,24	356,44	356,19	356,45	356,36	356,19	356,281	139,979	0,1103	-0,02
160	376,12	376,18	376,24	376,18	376,04	376,42	376,14	376,26	376,22	376,21	376,201	159,899	0,1003	-0,1
180	396,22	396,21	396,18	396,41	396,14	396,02	396,08	396,18	396,12	396,04	396,16	179,858	0,1115	-0,14
200	416,18	416,02	416,13	416,24	415,96	415,83	415,96	416,06	416,02	415,97	416,037	199,735	0,1205	-0,27

Kalibrace Libely – Návrh nového způsobu kalibrace libel

Tabulka 4

6.2.2 Nový způsob

Pro výpočet nejistoty byla vybrána nejvyšší hodnota výběrové směrodatné odchylky vycházející z tabulky č. 4, která obsahuje výsledky z provedených měření a výpočtů. V našem případě to byla hodnota $b_1 = -160 \mu\text{m}/\text{m}$, kde $s_1 = 0,5063 \mu\text{m}/\text{m}$. Tato hodnota byla dosazena do výpočtu jak pro hodnotu a_i , tak pro hodnotu a_0 . Tímto byla zajištěna, že i při měření mezi libovolnými kalibrovanými body nemůže vzniknout horší nejistota.

Vliv rozptylu naměřených hodnot – nejistota typu A

Příspěvek k nejistotě se vypočítá podle vztahu :

$$u_a = \frac{s_{\max}}{\sqrt{n}},$$

kde s_{\max} je výběrová směrodatná odchylka a n je počet opakovaných měření

$$u_a = \frac{0,5063}{\sqrt{10}} = 0,1601 \cong 0,16 \mu\text{m}/\text{m}$$

Vliv etalonu

Rozšířená nejistota etalonu $U = [\mu\text{m}/\text{m}]$ a koeficient rozšíření $k =$. Z toho plyne :

$$u_{b1} = \frac{U}{k}$$

$$u_{b1} = \frac{0,02}{2} = 0,01 \cdot 4,85 = 0,0485 \mu\text{m}/\text{m}$$

Vliv rozlišovací schopnosti

Rozlišovací schopnost je určena nejmenším desetinným číslem měřicí stupnice přístroje nebo nejnižší hodnotou, kterou jsme schopni odečíst na analogové stupnici přístroje.

$$u_{b2} = \frac{R}{\sqrt{3}},$$

kde R je rozlišovací schopnost měřidla.

Rozlišení stupnice při měření bylo $R = 0,01 \mu\text{m}/\text{m}$

$$u_{b2} = \frac{0,01}{\sqrt{3}} = 0,005774 \mu\text{m}/\text{m}$$

Vliv interpolace

Během měření se musí počítat s tím, že měřené hodnoty se budou nacházet mimo hodnoty, kde byl autokolimátor kalibrován. Vliv interpolace na nejistotu měření mezi těmito hodnotami určíme ze vztahu :

$$u_{b3} = \frac{u_{AK}}{\sqrt{3}}$$

Příspěvek k nejistotě z interpolace mezi hodnotami mezi kterými byl kalibrován autokolimátor :

$$u_{b3} = \frac{0,01}{\sqrt{3}} \cdot 4,85 = 0,028 \mu\text{m}/\text{m}$$

Kombinovaná nejistota je pak vektorovým součtem všech předešlých nejistot rozšířeno o 20% nedefinovaných vlivů (ty zahrnují např. různé chyby justáže, vlivy teploty, otřesů, etalonu atd.).

$$u = \sqrt{u_a^2 + u_{b1}^2 + u_{b2}^2 + u_{b3}^2} \cdot 1,2$$

$$u = \sqrt{0,16^2 + 0,0485^2 + 0,005774^2 + 0,028^2} \cdot 1,2 = 0,2036 \mu m / m$$

Rozšířená nejistota při koeficientu rozšíření je tedy :

$$U = 2 \cdot u$$

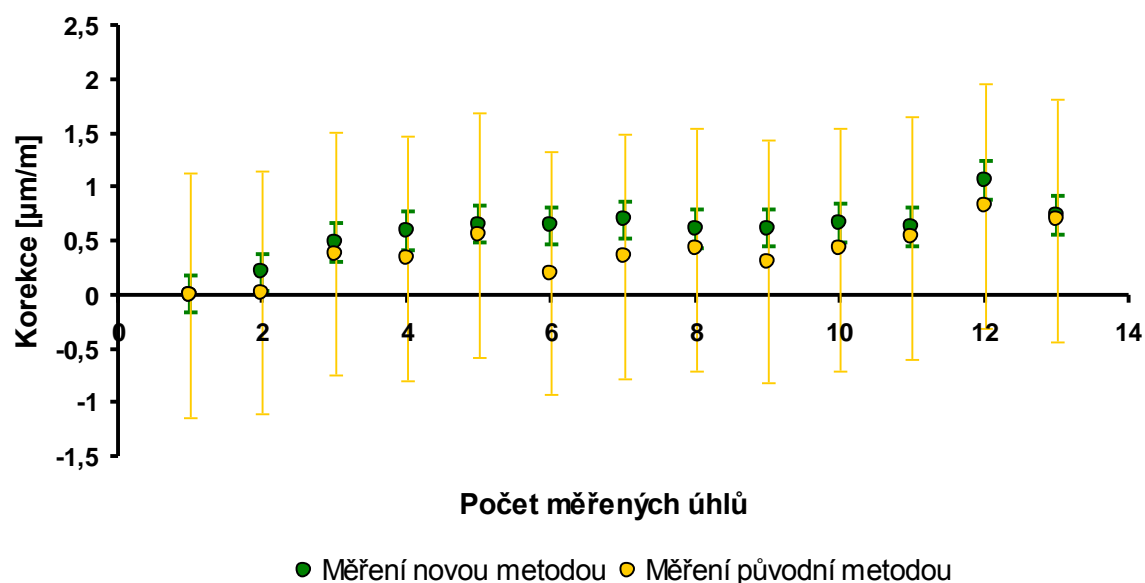
$$U = 2 \cdot 0,2036 = 0,4072 \mu m / m = \underline{\underline{0,0839''}}$$

6.3 Shrnutí výsledků vyhodnocení

Statistické vyhodnocování bylo provedeno s pomocí MS Excel.

V případě autokolimátorů návrh nové metody způsobu kalibrace přinesl toto zlepšení:

- Nejistota měření je u stávající metody $U = 1,124''$ a u návrhu nové metody $U = 0,175''$. Z tabulky č. 5 je zřejmé, že výrazné zlepšení se projevilo již při výpočtu standardní nejistoty. Nejistota se snížila o jeden řád, což je vysoké zvýšení přesnosti při kalibraci. Rozdíl rozšířených nejistot u obou metod je znázorněn v grafu č. 1.



Graf 1 Porovnání současné a nové metody kalibrace autokolimátoru

	Standardní nejistota u_A ["]	Kombinová nejistota u ["]	Rozšířená nejistota U ["]
Současný způsob kalibrace autokolimátorů	0,21	0,562	1,124
Nový způsob kalibrace autokolimátorů	0,0714	0,0877	0,175

Tabulka 5 Porovnání současné a nové metody kalibrace autokolimátoru z hlediska nejistot měření

U kalibrace libel návrh nové metody přinesl toto zlepšení:

- nejistota měření je u stávající metody $U = 0,9221''$ a u návrhu nové metody $U = 0,0839''$. Stejně jako v případě autokolimátorů jsou rozdíly výrazné již u standardní nejistoty.



Graf 2 Porovnání současné a nové metody kalibrace libely

	Standardní nejistota u_A ['']	Kombinová nejistota u ['']	Rozšířená nejistota U ['']
Současný způsob kalibrace libel	0,1	0,461	0,9221
Nový způsob kalibrace libel	0,033	0,042	0,0839

Tabulka 6 Porovnání současné a nové metody kalibrace libely z hlediska nejistot měření

7. Závěr

Jak již bylo uvedeno cílem předkládané bakalářské práce bylo navrhnout, experimentálně ověřit a vyšetřit podmínky pro praktickou aplikaci nového způsobu kalibrace elektronických libel a autokolimátorů.

Z naměřených hodnot a následným statistickým zpracováním dle metodiky výpočtu nejistot měření byly zjištěny následující skutečnosti shrnuté v tabulce č.7 a č.8.

- Z tabulky č. 7 je zřejmé, že výrazné zlepšení se projevilo hlavně u výpočtu nejistoty. Nejistota nové metody je výrazně nižší než u současné metody kalibrace autokolimátorů.
- Z hlediska posouzení času se jeví současná metoda oproti nové jako časově náročnější.
- Co se týče nákladů je nová metoda oproti současné dražší.
- Přehlednost je u nové metody větší, protože hodnoty lze snadno odečíst z displeje digitálního přístroje, na rozdíl od současné metody, kdy se hodnoty odečítají z úhloměrné stupnice GMÚ a je zde poměrně velká možnost špatného odečtení.

Hlediska	Současný způsob kalibrace autokolimátorů	Nový způsob kalibrace autokolimátorů
Nejistota měření $U ['']$	1,124	0,175
Čas	Časově náročnější	Rychlejší (snazší odečítání hodnot)
Náklady	Méně nákladné	Nákladnější (údržba etalonového autokolimátoru, náklady na přestavbu GMÚ)
Přehlednost	Menší (odečítání hodnot na úhloměrné stupnici GMÚ)	Větší (odečítání hodnot z digitálního přístroje)

Tabulka 7 Porovnání obou metod kalibrace autokolimátorů z několika hledisek

- Z tabulky č. 8, která obsahuje porovnání kalibrace libel plyne, že stejně jako je tomu v případě autokolimátorů je nejistota u nové metody výrazně menší, takže měření je přesnější.
- Náklady u nové metody jsou stejně jako v případě autokolimátorů vyšší. Ovšem na rozdíl od autokolimátorů zde nebyla potřeba přidávat zrcátko a tak navýšení nákladů je o to nižší.
- Hlediska čas a přehlednost jsou stejná jako u autokolimátoru. Současná metoda je oproti nové časově náročnější a méně přehledná.

Hlediska	Současný způsob kalibrace libel	Nový způsob kalibrace libel
Nejistota měření $U ['']$	0,9221	0,0839
Čas	Časově náročnější	Rychlejší (snazší odečítání hodnot)
Náklady	Méně nákladné	Nákladnější (údržba etalonového autokolimátoru)
Přehlednost	Menší (odečítání hodnot na úhloměrné stupnici GMÚ)	Větší (odečítání hodnot z digitálního přístroje)

Tabulka 8 Porovnání obou metod kalibrace libel z několika hledisek

Použitá literatura

Internetové odkazy

- [1] <http://www.cmi.cz/> oficiální stránky ČMI;
- [2] http://cs.wikipedia.org/wiki/Hlavní_strana;
- [3] <http://www.unmz.cz/>;
- [4] <http://uni-wax.cz/>
- [5] <http://www.mbcaltbr.cz/>

Literatura

- [6] Pernikář J., Jarošová J., Kružík M.; METROLOGIE: Návodv do laboratorních cvičení; Ústav strojírenské technologie Brno 2003
- [7] Brezina I.; Základy metrologie uhlov; 1982;
- [8] Šrámek Jan; Bakalářská práce: Nejistoty přesných délkových měření; VUT v Brně, 2008;
- [9] Zákon č. 505/1990 Sb. ze dne 16. 11. 1990, o metrologii.
- [10] Český metrologický institut. Metrologie v kostce. 2 vyd. Brno, 2003. CD ROM ISBN -;
- [11] EAL Committee 2: EA 4/02 Vyjadřování nejistot měření při kalibracích;
- [12] Ludník,V.; SBORNÍKY TECHNICKÉ HARMONIZACE: Nejistoty měření, přesnost měření, správnost měření a otázky spojené se vzájemnou porovnatelností výsledků měření a s prohlášením o shodě s technickými specifikacemi; ÚNMZ; 2005;
- [13] Návodv k použití etalonu; ČMI OI Liberec;

Seznam příloh

Příloha	Název	Počet stran
Příloha 1.	Průběh praktické části experimentu	2
Příloha 2.	Vzor Kalibračního listu	2

Příloha 1

1. Průběh praktické části experimentu

1.1 Kalibrace elektronického autokolimátoru

Tento postup se používá pro ověřování a kalibraci vizuálních a fotoelektrických autokolimátorů. Při kalibraci se porovnává hodnota úhlu vytvořeného pomocí etalonu s úhlem, naměřeným pomocí autokolimátoru. Etalonem je (u současné metody) generátor malých úhlů nebo (u nové metody) autokolimátor státního etalonu.

Příprava zařízení:

Autokolimátor se nainstaluje na desku generátoru malých úhlů tak, aby se v přístroji objevil autokolimační obraz. Úhloměrná stupnice autokolimátoru se nastaví na střed stupnice a generátor malých úhlů se nastaví tak, aby se autokolimační obraz kryl s nitkovým křížem autokolimátoru.

Vlastní kalibrace:

Jako etalon rovinného úhlu je použit buď generátor malých úhlů nebo autokolimátor Elcomat 3000. Při použití generátoru malých úhlů je hodnota odčítána na bubínku jeho mikrometrického šroubu. Paprsek etalonového autokolimátoru je zacílen na zrcátko umístěné v pohyblivém rameni generátoru malých úhlů.

Nejdříve se provede vnější prohlídka a funkční zkouška. Při těchto zkouškách se sleduje, zda přístroj není zjevně poškozen a jestli všechny jeho části fungují. Další postup je podrobně popsán v normě PNÚ 1142.2

Vyhodnocení měření:

Postup je podrobně popsán v normě PNÚ 1142.2 Z jednotlivých naměřených hodnot se vypočítá střední hodnota a výběrová směrodatná odchylka. Střední hodnota náměrů se porovná se jmenovitým úhlem autkolimátoru a stanoví se korekce v jednotlivých měřených bodech stupnice. Úhly a jejich korekce jsou vztaženy k nulovému bodu stupnice autkolimátoru. Do kalibračního listu se uvedou hodnoty zjištěných korekcí a přístroj se zařadí do příslušné třídy ve smyslu ustanovení PNÚ 1142.1 .

1.2 Kalibrace elektronické libely

Tento postup se používá pro kalibraci kapalinových i jiných libel se jmenovitou citlivostí 0,01 $\mu\text{m/m}$ a více. U elektronických libel se zvolí počet bodů na stupnici, přičemž v těchto bodech se porovnává udávány úhel s hodnotou úhlu na etalonovém zařízení.

Příprava zařízení:

Generátor malých úhlů volně položený na granitové desce, nebo na laboratorním stole pevně vetknutém do stěny budovy je očištěn od případného prachu a seřídí se tak, aby jeho pracovní plocha zaujímal vodorovnou polohu. Toto se provádí pomocí zkalibrované koincidenční libely v podélném i příčném směru.

Samotná libela je nejprve zbavena nečistot, její pracovní plocha je odkonzervována benzinem. Potom je podrobena vnější technické prohlídce a funkční zkoušce. Při této operaci se zkontroluje stav pracovní (dosedací) plochy, její rovinnost nožovým pravítkem na průsvit. Funkční zkouškou se kontroluje plynulost chodu bubliny a snadnost pohybu mikrometrického šroubu a případných dalších ovládacích prvků.

Vlastní kalibrace:

Jako etalon rovinného úhlu je použit buď generátor malých úhlů nebo autokolimátor Elcomat 3000. Při použití generátoru malých úhlů je hodnota odčítána na bubínku jeho mikrometrického šroubu. Paprsek etalonového autokolimátoru je zacílen na zrcátko umístěné v pohyblivém rameni generátoru malých úhlů.

Zkoušená libela se položí na zkušební plošinu generátoru malých úhlů. Generátor se nastaví tak, aby na libele byla první hodnota (v našem případě - 200 $\mu\text{m/m}$). U současné metody se odečte úhel na bubínku generátoru malých úhlů a hodnota se zapíše. U nové metody se hodnota odečte z displeje autokolimátoru státního etalonu a hodnota se zapíše. Obdobným způsobem se změří další hodnoty. Pro každou hodnotu se provádí více měření. Jejich počet se volí s ohledem na požadovanou nejistotu.

Vyhodnocení měření:

U každé naměřené hodnoty se vypočítá střední hodnota naměřených hodnot na generátoru malých úhlů nebo na autokolimátoru státního etalonu. Vypočítá se výběrová směrodatná odchylka. Stanoví se korekce v jednotlivých měřených bodech stupnice, tyto korekce jsou vztaženy k nulovému bodu stupnice libely. Do kalibračního listu se uvedou hodnoty zjištěných korekcí a přístroj se zařadí do příslušné třídy.

Příloha 2

Pracoviště:

KALIBRAČNÍ LIST

Datum vystavení:

Zákazník:

Měřidlo:

Výrobce:

Typ:

Výrobní číslo:

Použité etalony:

Kalibrační postup:

Podmínky měření:

Datum vystavení:

Kalibraci provedl:

Metrolog:

Výsledky kalibrace:

Jmenovitá hodnota	Korekce

Nejistota měření: